

CLIPPEDIMAGE= JP403213500A

PAT-NO: JP403213500A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 03213500 A

TITLE: GRAVITY-FREE SIMULATING DEVICE

PUBN-DATE: September 18, 1991

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

IOI, KIYOSHI

NORO, OSAMU

MIKI, OSATAKE

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

KAWASAKI HEAVY IND LTD

COUNTRY

N/A

APPL-NO: JP02009257

APPL-DATE: January 17, 1990

INT-CL (IPC): B64G007/00

US-CL-CURRENT: 244/158R

ABSTRACT:

PURPOSE: To facilitate production of the gravity-free state of an object by mounting a test piece on an active drive mechanism, having at least six degrees of freedom, through a sensor, and effecting feedback of the active drive mechanism so that a detecting force and torque are balanced with gravity of the test piece.

CONSTITUTION: An active drive mechanism 2, e.g. an industrial robot, is located on a ground 1, and a test piece 4 is mounted on the active drive mechanism 2 through a sensor 3 to detect a force and torque. The sensor 3 is arranged so

as to allow detection of the forces of X-Z-axes and torque around the X-Z-axes. The active drive mechanism 2 is formed so that an object 4 can be actively driven in orientation to roll, pitch, and yaw around each of X-Z-axes. Feedback control is made on the active drive mechanism 2 so that a force and torque detected by the sensor 3 are balanced with gravity of the test piece 4, and feed forward control is effected according to the speed detecting value of the test piece.

COPYRIGHT: (C)1991, JPO&Japio

⑤Int. Cl.⁵

B 64 G 7/00

識別記号

A

庁内整理番号

8817-3D

⑬公開 平成3年(1991)9月18日

審査請求 未請求 請求項の数 3(全10頁)

⑭発明の名称 無重力模擬装置

⑰特 願 平2-9257

⑱出 願 平2(1990)1月17日

⑲発明者 五百井 清 兵庫県明石市川崎町1番1号 川崎重工業株式会社明石工場内
 ⑲発明者 野 呂 治 兵庫県明石市川崎町1番1号 川崎重工業株式会社明石工場内
 ⑲発明者 三 木 修 武 兵庫県明石市川崎町1番1号 川崎重工業株式会社明石工場内
 ⑲出 願 人 川崎重工業株式会社 兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号
 ⑲代 理 人 弁理士 西教 圭一郎 外1名

明 細 書

1. 発明の名称

無重力模擬装置

2. 特許請求の範囲

(1)被試験体を少なくとも6自由度で区分する能動駆動機構と、

被試験体の能動駆動機構との間に介在され、被試験体に作用する力およびトルクを検出するセンサと、

前記センサの出力にตอบสนองし、そのセンサによって検出される力およびトルクが被試験体の重力と釣り合うように能動駆動機構をフィードバック制御する手段とを含むことを特徴とする無重力模擬装置。

(2)前記制御手段は、動的外力補償を行うことを特徴とする特許請求の範囲第1項記載の無重力模擬装置。

(3)被試験体の速度を求める速度検出手段を備え、

前記制御手段は、速度検出手段の出力にตอบสนองしてフィードフォワード制御することを特徴とする

特許請求の範囲第1項記載の無重力模擬装置。

3. 発明の詳細な説明

産業上の利用分野

本発明は、たとえば宇宙船のドッキングなどのように無重力状態での物体の衝突後の運動などを模擬することができるようにするための無重力模擬装置に関する。

従来の技術

宇宙空間での各種ミッション作業に伴う動作の中には、捕捉結合動作をはじめとして、力学的に浮遊物体の接触、衝突現象とみなせる動作が数多く存在する。これらの接触、衝突を伴う作業が支障なく円滑に遂行されるように機器を設計、製作し、作業計画を立案するためには、着目する物体が接触、衝突時にどのような挙動をするかを出きる限り正確に知る必要がある。このための最も直接的で有効な方法は、地上において物体の宇宙空間における浮遊状態を再現することである。

従来、地上での再現実験には次のような手法が用いられてきたが、それぞれに以下のような問題

点があつた。空気浮上型や磁気浮上型の実験装置では、物体の運動が平面内運動に限られ、3次元空間運動を模擬できないという欠点があつた。

また、重力と浮力を釣り合わせた水中内実験では、水の抵抗や付加質量のために、物体の動特性が変化してしまうという問題点があつた。

さらに、単純に、6自由度運動機構（たとえば、ガーダとジンバル機構で構成された装置）に物体を取り付けるだけでは、その運動機構の質量特性が物体の運動に影響するため、物体そのものの運動を再現できないという問題点があつた。

また、計算機内部に物体の運動方程式モデルを有して、時々刻々その運動を数値計算し、物体を動かす手法は、計算機の負担が大きく、実時間シミュレーションには不向きであるという難点があつた。

さらに、落下塔や航空機内で無重力環境をつくり出すのは、装置が大がかりで長い時間の運動の模擬には適していない。

発明が解決すべき課題

-3-

作 用

本発明に従えば、少なくとも能動6自由度運動機構（たとえば6自由度ロボットアーム）の先に取り付けられた物体の重力をキャンセルし、かつ能動運動機構先端の等価慣性質量および等価慣性モーメントをできる限り小さくするように制御を加えて、取り付けられた物体があたかも無重力空間を漂っているかのような運動を簡易的に実現する。

すなわち本発明の基本的考え方は、無重力運動を模擬させたい物体と能動6自由度運動機構先端の取り付け部との間に、力／トルクセンサを取り付け、そのセンサ力が常に被試験体の重力と釣り合うように、能動運動機構を制御するという考え方である。

実施例

第1図は、本発明の一実施例の簡略化した断面図である。大地1上には産業用ロボットなどの能動駆動機構2が設けられ、この能動駆動機構2にはセンサ3を介して被試験体4が取り付けられる。センサ3は、被試験体4に作用する力およびトル

本発明の目的は、3次元での無重力状態を、実時間で容易に実現することができるようにした無重力模擬装置を提供することである。

課題を解決するための手段

本発明は、被試験体を少なくとも6自由度で区分する能動駆動機構と、

被試験体の能動駆動機構との間に介在され、被試験体に作用する力およびトルクを検出するセンサと、

前記センサの出力に応答し、そのセンサによって検出される力およびトルクが被試験体の重力と釣り合うように能動駆動機構をフィードバック制御する手段とを含むことを特徴とする無重力模擬装置である。

また本発明は、前記制御手段は、動的外力補償を行うことを特徴とする。

また本発明は、被試験体の速度を求める速度検出手段を備え、

前記制御手段は、速度検出手段の出力に응答してフィードフォワード制御することを特徴とする。

-4-

クを検出する。重力加速度は参照符Gで示されている。

センサ3は、直交するX、YおよびZの各軸の力を検出し、またそれらのX、YおよびZの各軸まわりのトルクを検出する。6自由度の能動駆動機構2は、たとえばX、Y、Zの各軸の位置を取ることができ、またそれらの各軸まわりのロール、ピッチおよびヨーの姿勢を取つて、物体4を能動駆動することができる。

本発明の3次元における無重力模擬を行うための構成の理解を容易にするために、まず第2図を参照して、物体である被試験体4に関する1自由度運動機構を参照して、本発明の基本的な考え方を1自由度運動において説明する。物体4の質量を M_p 、能動1自由度運動機構2aの質量を M_q とする。物体に作用する外力を F_e 、力センサ3を介して物体に作用する力を F_r 、その反作用力を $(-F_r)$ とする。また、能動1自由度運動機構2aを駆動する駆動力を τ 、物体4の変位を x_p とする。

1 自由度運動における無重力運動とは、質量 M_p の物体 4 が、外力 F_e に対してニュートン (Newton) の運動方程式、

$$M_p \cdot \ddot{x}_p = F_e \quad \dots (1)$$

($\ddot{}$ は時間の 2 階微分)

に従って運動することである。

ところが、能動 1 自由度運動機構 2 a に取り付けられた物体 4 の運動方程式は、以下のようになつてしまう。

$$M_p \cdot \ddot{x}_p = F_e + F_r \quad \dots (2)$$

$$M_q \cdot \ddot{x}_p = \tau - F_r \quad \dots (3)$$

第 2 式および第 3 式を和して、

$$(M_p + M_q) \cdot \ddot{x}_p = F_e + \tau \quad \dots (4)$$

$\tau \equiv 0$ の場合が受動的な運動機構に取り付けただけの場合であり、その場合、質量は ($M_p + M_q$) に変わつてしまい、物体 4 そのものの質量 M_p を表現していないことがわかる。

そこで、力センサ 3 の信号 F_r を利用して、駆動力 τ を変化させ、駆動機構 2 a を能動的に動かして、 M_q の影響を極力、排除する制御系を構成

することを考える。すなわち能動駆動機構 2 a に入力する駆動力 τ を、第 3 図の制御補償器 g_d を介して

$$\tau = -g_d \cdot F_r \quad \dots (5)$$

と構成する。

第 2 式、第 3 式、第 5 式から、 τ と F_r を消去すると下式になる。

$$(M_p + \frac{M_q}{1+g_d}) \cdot \ddot{x}_p = F_e \quad \dots (6)$$

第 6 式は、制御補償器 g_d のゲインが十分大きければ、第 1 式の運動を近似的に表現している。すなわちセンサ 3 の出力 F_r をフィードバック制御することで、1 自由度運動機構 2 a の質量 M_q をほとんど無視できるようにすることができる。特に、補償器 g_d の構成によつて、衝突の瞬間の応答を除いて、 F_r を速やかにゼロ収束させることができれば、接触後の運動は、 x_p 方向に物体 4 の無拘束 (無重力) 運動が達成されることになる。

このような制御補償器 g_d の構成の例として第

-7-

3 図に示す P、I、I、D (比例、積分、積分、微分) 型の補償器を考える。このとき、伝達関数表現で

$$g_d(s) = s^1 \cdot K_v + K_p + \frac{K_{i1}}{s} + \frac{K_{i2}}{s^2} \quad \dots (7)$$

($K_v, K_p, K_{i1}, K_{i2} \geq 0$)

となる。この実際の構成図は、第 3 図に示されたとおりであつて、 K_p は定数項 5 であり、 s^1 は微分器 6 であり、 K_{i1} 、 K_{i2} および K_v は定数項を掛算する係数器 7、8、9 を示しており、 $1/s$ は積分器 10、11 を示しており、また、減算器 12 および加算器 13 が備えられる。

第 2 式、第 3 式、第 5 式および第 7 式から、 \ddot{x}_p および τ を消去して、 F_e から F_r への伝達関数 $G(s)$ を構成すると、

$$G(s) = \frac{M_g}{M_g + (1+g_d) \cdot M_p} = \frac{s^2 \cdot M_g}{s^2 \cdot M_p K_v + s^2 \cdot [M_g + (1+K_p) \cdot M_p] + s^1 \cdot K_{i1} \cdot M_p + K_{i2} \cdot M_p} \quad \dots (8)$$

$M_q, M_p > 0$ から、 $K_{i2} = 0$ のとき、 $G(s)$ は安定な伝達関数となる。

-8-

また $K_{i2} > 0$ の場合も

$$[M_q + (1+K_p) \cdot M_p] \cdot K_{i1} \cdot M_p - M_p K_v \cdot K_{i2} \cdot M_p > 0 \quad \dots (9)$$

にゲインパラメータを調整すれば、安定な 3 次遅れ系となる。この g_d の構成は、P、I 型、P、D 型の構成を包含しており、これらは定数ゲインの対応する部分を 0 にするだけで実現できる。

以上で 1 自由度運動における物体の無拘束運動が実現できることがわかる。以下では物体 4 が空間内で無重力運動を模擬する構成についてのべる。

第 4 図は、無重力空間で物体に外力 F_e が作用する場合の模式図である。被試験物体 4 に固定された直交座標系を Σ^* とし、この座標系のベクトルおよびテンソル表現は、右上肩に添字 p を付すものとする。また、能動 6 自由度運動機構のすえ付けられた固定座標系を Σ^o とし、この座標系のベクトルおよびテンソル表現は、右上肩に添字 o を付すものとする。

無重力空間に物体が浮遊しており、この物体に外力 F_e が作用した場合、その運動は、ニュートン

-9-

-829-

-10-

点の角速度を被試験物体 4 のそれと同じとすると、

$$\dot{V}_r^0 = \dot{V}_p^0 + \omega_p^0 \times a_r^0 \quad \dots (17)$$

$$\omega_r^0 = \omega_p^0 \quad \dots (18)$$

第 17 式および第 18 式を時間で 1 回微分して、
加速度的関係を導くと、

$$\dot{\dot{V}}_r^0 = \dot{\dot{V}}_p^0 + \dot{\omega}_p^0 \times a_r^0 + \omega_p^0 \times \dot{a}_r^0 \quad \dots (19)$$

$$\dot{\omega}_r^0 = \dot{\omega}_p^0 \quad \dots (20)$$

ところで、能動 6 自由度機構 2 の各アクチュエータの変位速度 \dot{q} と取り付け点の並進速度、角速度には当然関係があるから、

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_r^0 \\ \dot{\omega}_r^0 \end{pmatrix} = J_q \cdot \dot{q} \quad \dots (21)$$

ここで、 J_q は能動 6 自由度機構のヤコビ行列で、第 15 式に現われた行列と同じものである。第 21 式の両辺を 1 回微分して加速度的関係を導くと、下のようになる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\dot{V}}_r^0 \\ \dot{\dot{\omega}}_r^0 \end{pmatrix} = J_q \cdot \dot{\dot{q}} + \dot{J}_q \cdot \dot{q} \quad \dots (22)$$

被試験物体 4 の無重力運動を模擬する可動範囲内で、能動 6 自由度運動機構は、機構の特異点を

-15-

つて表現し直すと、

$$\begin{bmatrix} M_p E & 0 \\ 0 & T_{op} I_p^0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_p^0 \\ \dot{\omega}_p^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_{op} (\omega_p^0 \times (I_p^0 \omega_p^0)) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} F_e^0 \\ a_e^0 \times F_e^0 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_r^0 \\ N_r^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_p E \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_p^0 \\ \dot{\omega}_p^0 \end{pmatrix} \quad \dots (27)$$

第 24 式および第 27 式から、 F_r 、 N_r を消去すると（ただし、 ${}^t A_0 = -A_0$ ）

$$\begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} {}^t J_q^{-1} I_q J_q^{-1} \begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_p^0 \\ \dot{\omega}_p^0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_p E \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_p^0 \\ \dot{\omega}_p^0 \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} {}^t J_q^{-1} I_q J_q^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} \omega_p^0 \times a_r^0 \\ 0 \end{pmatrix} - J_q \cdot \dot{q} \right\} - \begin{pmatrix} 0 \\ T_{op} (\omega_p^0 \times (I_p^0 \omega_p^0)) \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} {}^t J_q^{-1} (f_q + G_q) + \begin{pmatrix} M_q g^0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} {}^t J_q^{-1} \cdot \tau - \begin{pmatrix} F_e^0 \\ a_e^0 \times F_e^0 \end{pmatrix} \quad \dots (28)$$

すなわち、この第 28 式が、能動 6 自由度機構に被試験物体 4 が取り付けられ、能動 6 自由度機構 2 の各アクチュエータに力 τ が作用し、さらに、被試験物体 4 に外力 F_e が作用する場合の運動方程式であり、簡単な 1 自由度機構の第 4 式に

-17-

通らず、ヤコビ行列 J_q は正則であるとする。このとき第 22 式から（-1 は逆行列を表す）、

$$\dot{\dot{q}} = J_q^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} \dot{\dot{V}}_r^0 \\ \dot{\dot{\omega}}_r^0 \end{pmatrix} - \dot{J}_q \cdot \dot{q} \right\} \quad \dots (23)$$

第 23 式を第 15 式に代入して、第 19 式および第 20 式の関係から、 \dot{V}_r と $\dot{\omega}_r$ を $\dot{\omega}_p$ 、 \dot{V}_p で表現すると、以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} {}^t J_q^{-1} \cdot I_q \cdot J_q^{-1} \left(\begin{pmatrix} E \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} \right) \cdot \begin{pmatrix} \dot{V}_p^0 \\ \dot{\omega}_p^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_p^0 \times a_r^0 \\ 0 \end{pmatrix} - J_q \cdot \dot{q} \end{pmatrix} \\ + {}^t J_q^{-1} (f_q + G_q) = {}^t J^{-1} \cdot \tau + \begin{pmatrix} F_e^0 \\ N_r^0 \end{pmatrix} \quad \dots (24)$$

ただし、ここで

$$A_0 \equiv \begin{pmatrix} 0 & -a_{rz} & a_{ry} \\ a_{rz} & 0 & -a_{rx} \\ -a_{ry} & a_{rx} & 0 \end{pmatrix} \quad \dots (25)$$

$$a_r^0 \equiv \begin{pmatrix} a_{rx} \\ a_{ry} \\ a_{rz} \end{pmatrix} \quad \dots (26)$$

とした。また E は 3 行 3 列の単位行列である。

また、第 16 式の $[R_r^0 \times]$ の部分も A_0 を使

-16-

対応するものである。

この第 28 式が、第 12 式と全く同じ式を表わすように、各アクチュエータの入力 τ を決めれば、被試験物体 4 は無重力運動を実現できたことになる。

第 6 図は、6 自由度能動駆動機構 2 の各軸変位情報とその先端に設けられた力／トルクセンサ 3 の情報を利用した無重力運動を模擬するシミュレータのブロック図である。この第 6 図において、6 行 6 列の対角制御補償器 15 と、6 行 6 列の積演算回路 16、17、18 と、6 行 6 列転置ヤコビ行列の積演算回路 19 および 6 行 6 列転置ヤコビ行列の積演算回路 20 と、加算回路 21、22、23 とが備えられる。

第 12 式と第 28 式を比較して、両式が等しくなる条件は、下の等式となる。

$$\begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} {}^t J_q^{-1} I_q J_q^{-1} \begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{V}_p^0 \\ \dot{\omega}_p^0 \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} E \\ A_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \end{pmatrix} {}^t J_q^{-1} I_q J_q^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} \omega_p^0 \times a_r^0 \\ 0 \end{pmatrix} - J_q \cdot \dot{q} \right\}$$

-18-

$$+ \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} J_q^{-1} \cdot (f_q + G_q) + \left(\begin{array}{c|c} M_q & \dot{x}_q^0 \\ \hline O & O \end{array} \right)$$

$$= \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} J_q^{-1} \cdot \tau \quad \dots (29)$$

第29式を簡単化して、

$$\tau = I_q \cdot J_q^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} \left(\begin{array}{c} \dot{V}_p^0 \\ \omega_p^0 \end{array} \right) + I_q J_q^{-1} \left(\left(\begin{array}{c|c} \omega_p^0 \times \dot{a}_x^0 \\ O \end{array} \right) - J_q \cdot \dot{q} \right) + f_q$$

$$+ J_q \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c} M_q \cdot \dot{x}_q^0 \\ O \end{array} \right) + G_q \quad \dots (30)$$

したがって能動6自由度駆動機構の出力 τ を静的力 τ_s および動的力 τ_o の和($\tau = \tau_s + \tau_o$)として、

$$\tau_s = J_q \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c} M_q \cdot \dot{x}_q^0 \\ O \end{array} \right) + G_q \quad \dots (31)$$

$$\tau_o = I_q \cdot J_q^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} \left(\begin{array}{c} \dot{V}_p^0 \\ \omega_p^0 \end{array} \right) + I_q J_q^{-1} \left(\left(\begin{array}{c|c} \omega_p^0 \times \dot{a}_x^0 \\ O \end{array} \right) - J_q \cdot \dot{q} \right) + f_q$$

ただし、第31式において

$$\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline -A_o & E \end{array} \right) \quad \dots (32)$$

を利用した。

-19-

第34式において、 F_r 、 N_r は能動6自由度駆動機構2と被試験物体4の取り付け部に装備された力/トルクセンサ3から検出可能とし、また G_r は制御用補償器(6行6列)である。

ところで、この第34式は第16式の等式を考えると、以下のように表現できる。

$$\tau_o = G_r \cdot \left[\left(\begin{array}{c|c} M_p E & O \\ \hline O & Top I_p^* \end{array} \right)^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c} \dot{V}_p^0 \\ \omega_p^0 \end{array} \right) \right.$$

$$\left. + \left(\begin{array}{c|c} O & \\ \hline Top(\omega_p^* \times (I_p^* \omega_p^*)) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} Fe^0 \\ ae^0 \times Fe^0 \end{array} \right) \right] \quad \dots (35)$$

したがって、第31式の静的力 τ_s と第34式の動的フィードバック τ_o を適用した場合、第31式と第35式を第28式に代入した式が、被試験体を支配する方程式となる。第31式および第35式を第28式に代入して、 τ を消去して以下の式が導かれる。

$$\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} J_q^{-1} \cdot I_q \cdot J_q^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} \left(\begin{array}{c} \dot{V}_p^0 \\ \omega_p^0 \end{array} \right)$$

$$+ \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} J_q^{-1} \cdot \left[I_q \cdot J_q^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c|c} \omega_p^0 \times \dot{a}_x^0 \\ O \end{array} \right) - J_q \cdot \dot{q} \right] + f_q$$

-21-

すなわち、第31式の静的力 τ_s と動的力 τ_o を理想的に入力できれば、第28式の運動は、目標とする第12式の運動を実現することになる。しかしながら、上記入力の動的力 τ_o は加速度を含む動的フィードフォワード項となるため、その実現は難しい。

そこで、静的力 τ_s はフィードフォワード計算で補償し、動的力 τ_o は力検出器(力/トルクセンサ)3からフィードバック補償で補償する手法を提案する。

第7図は、この第6図における無重力運動シミュレータの構成図においてさらに非線型速度のフィードフォワード5を追加した実施例を示すブロック図である。6行6列ヤコビ行列の時間積分の積演算回路25と、6行6列逆ヤコビ行列の積演算回路26と、6行6列慣性行列の積演算回路27と、加算回路28、29とが備えられる。

τ_o を以下のように構成する。

$$\tau_o = G_r \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c} F_r^0 \\ N_r^0 \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} M_p \cdot \dot{x}_p^0 \\ O \end{array} \right) \quad \dots (36)$$

-20-

$$= \left[\left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline O & E \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} J_q^{-1} \cdot G_r \right]$$

$$\cdot \left[\left(\begin{array}{c|c} M_p E & O \\ \hline O & Top I_p^* \end{array} \right)^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c} \dot{V}_p^0 \\ \omega_p^0 \end{array} \right) \right.$$

$$\left. + \left(\begin{array}{c|c} O & \\ \hline Top(\omega_p^* \times (I_p^* \omega_p^*)) \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} Fe^0 \\ ae^0 \times Fe^0 \end{array} \right) \right] \quad \dots (38)$$

第36式は、簡単な1自由度の場合の第6式に対応しており、制御補償器 G_r のゲインが十分大きければ、第36式の左辺は相対的に影響が少なくなり、第12式の運動に漸近することになる。

制御補償器 G_r の代りに、以下の式で新しく制御補償器 G_o (6×6)を定義する。

$$G_o \equiv \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right)^{-1} J_q^{-1} \cdot G_r \quad \dots (37)$$

このとき G_r の G_o に対する関係は、

$$G_r = J_q \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & O \\ \hline A_o & E \end{array} \right) \cdot G_o \quad \dots (38)$$

G_o は6行6列の補償要素であるが、その最も簡単な構成は、第7式のように、対角成分だけに、P、I、D型の補償器で構成すれば良い。さらには G_o の非対角成分にも補償要素を入れて、

-832-

-22-

さらに特性の良い補償器 G_c を構成することも可能である。

第31式と第34式に基づいた前述の第6図のコントローラの構成において、図中の

$$\begin{bmatrix} E & 0 \\ A_0 & E \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} E & 0 \\ -A_0 & E \end{bmatrix} \quad (6\text{行}6\text{列}) \quad \dots (39)$$

は被試験体の質量中心と、能動6自由度運動機構の取り付け点の位置だけで決定される定数行列である。 J_q は能動6自由度運動機構の転置ヤコビ行列のため、時々刻々行列の成分が変化するため、マイクロコンピュータで演算、更新を行う。第6図の破線部14が、第31式の π_s と第34式の π_v を使った基本構成である。

次に、さらに進んだ構成の例を与える。これは能動6自由度運動機構の速度 \dot{q} も検出可能な場合か、あるいは q から疑似微分 $\hat{\dot{q}}$ を生成して \dot{q} を情報として使用できる場合に有効な手法である。 \dot{q} が検出できることから、新しく入力 π_r として、以下の入力を加える。

-23-

ビュータを増設すれば十分可能で、その構成図を、前述の第7図に示す。

以上、被試験物体の無重力運動を模擬するために、能動6自由度運動機構に取り付け、その取り付け点の力/トルクをフィードバック制御することで無重力運動模擬装置を構成することができる。この発明では、能動駆動機構の変位と力検出器の力/トルクだけを利用する構成と、さらに能動駆動機構の速度情報も利用する構成がある。

発明の効果

以上のように本発明によれば、少なくとも6自由度を有するロボットなどのような能動駆動機構に、力およびトルクを検出するセンサを介して被試験体を取り付け、このセンサによつて検出される力およびトルクが被試験体の重力と釣り合うように能動駆動機構をフィードバックするようにしたので、3次元で物体の無重力状態を比較的容易にかつ実時間で実現することが可能である。

さらにまた本発明によれば、制御手段は動的な力補償を行い、さらにまた被試験体の速度を検出

$$\pi_r = I_q \cdot J_q^{-1} \cdot \left(\frac{\omega p^0 \times \dot{a}_0}{0} \right) - J_q \cdot \dot{q} + f_q(q, \dot{q}) \quad \dots (40)$$

$$\pi = \pi_s + \pi_v + \pi_r \quad \dots (41)$$

を考える。この補償を行つた場合、第36式左辺の速度に関する項がなくなつて、以下になる。

$$\begin{aligned} & \left(\begin{array}{c|c} E & 0 \\ \hline A_0 & E \end{array} \right) \cdot J_q^{-1} \cdot I_q \cdot J_q^{-1} \cdot \left(\begin{array}{c|c} E & 0 \\ \hline A_0 & E \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \dot{V}_p^0 \\ \omega p^0 \end{array} \right) \\ &= \left[\left(\begin{array}{c|c} E & 0 \\ \hline 0 & E \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c|c} E & 0 \\ \hline A_0 & E \end{array} \right) \cdot J_q^{-1} \cdot G_r \right] \\ &\quad \times \left[\begin{array}{c|c} M_0 E & 0 \\ \hline 0 & T_{op} I_p^0 \end{array} \right] \cdot \left(\begin{array}{c} \dot{V}_p^0 \\ \omega p^0 \end{array} \right) \\ &\quad + \left(\frac{0}{T_{op}(\omega p^0 \times (I_p^0 \omega p^0))} \right) - \left(\frac{F_e^0}{a_e^0 \times F_e^0} \right) \quad \dots (42) \end{aligned}$$

π_r は非線型速度のフィードフォワード項を追加することに対応しており、応答はすぐれたものになるが、逆ヤコビ行列の演算 (J_q^{-1}) や、能動6自由度運動機構の慣性行列 I_q の計算等の演算の負担が増える。しかしながら、マイクロコン

-24-

し、その速度検出手段の出力に基づいてフィードフォワード制御を行うようにし、これによつて高精度の無重力状態を実現することが可能となる。

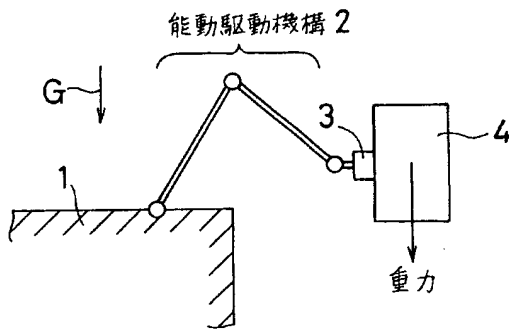
4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明の一実施例の無重力模擬装置の概要を示す断面図、第2図は物体4が取り付けられた1自由度運動機構2aを示す図、第3図は補償器gdの構成を示すブロック図、第4図は無重力空間で物体に外力 F_e が作用する場合の模式図、第5図は地上の重力場で能動駆動機構2を介して吊り下げられた物体4に作用する外力を示す模式図、第6図は6自由度能動駆動機構2の各軸変位情報とセンサ3の情報とを利用した無重力運動模擬装置の構成を示すブロック図、第7図は本発明の他の実施例における非線型速度のフィードフォワード項を追加した構成を示すブロック図である。

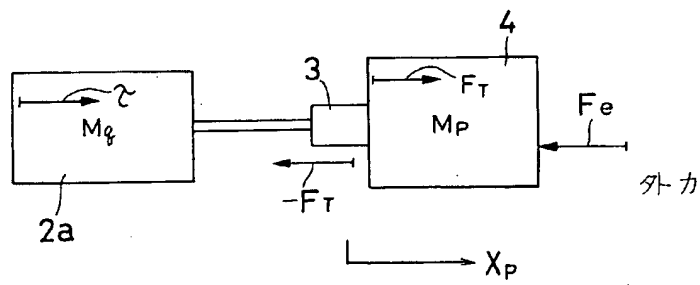
1…大地、2、2a…能動駆動機構、3…センサ、4…重力

代理人 弁理士 西教 圭一郎

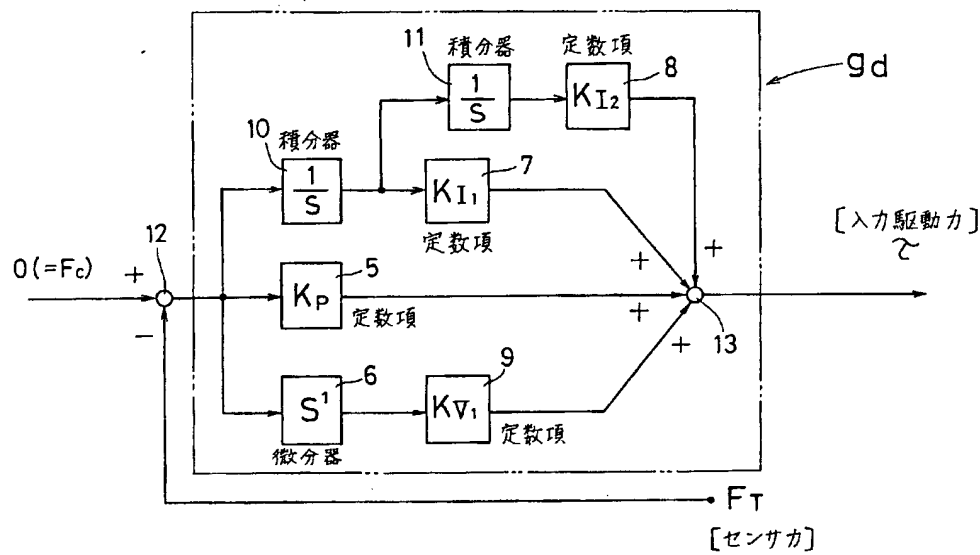
第 1 図



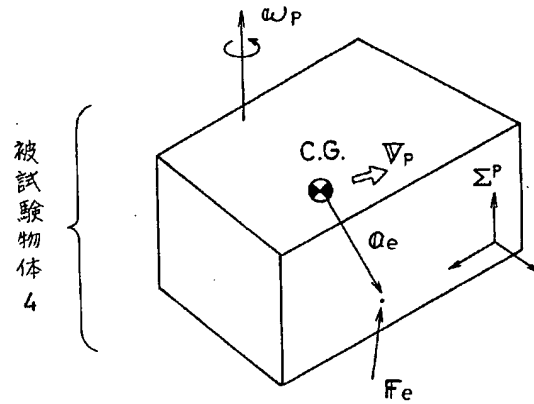
第 2 図



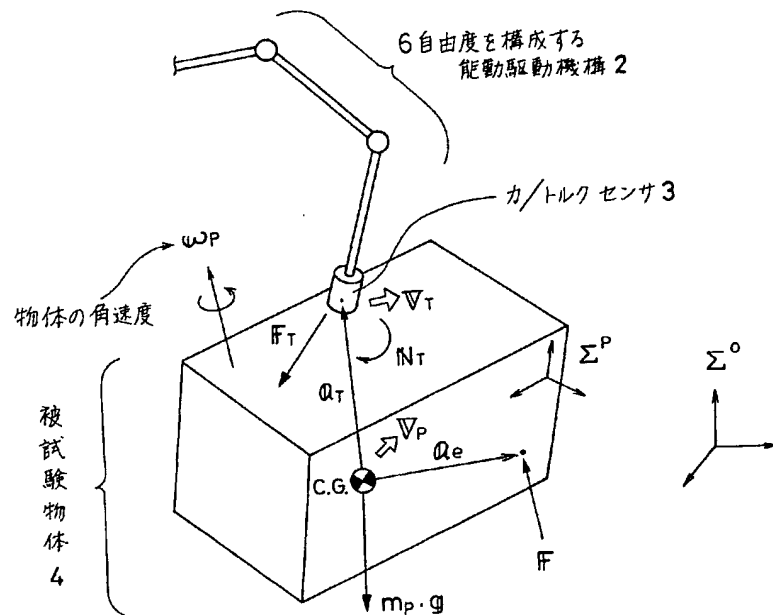
第 3 図



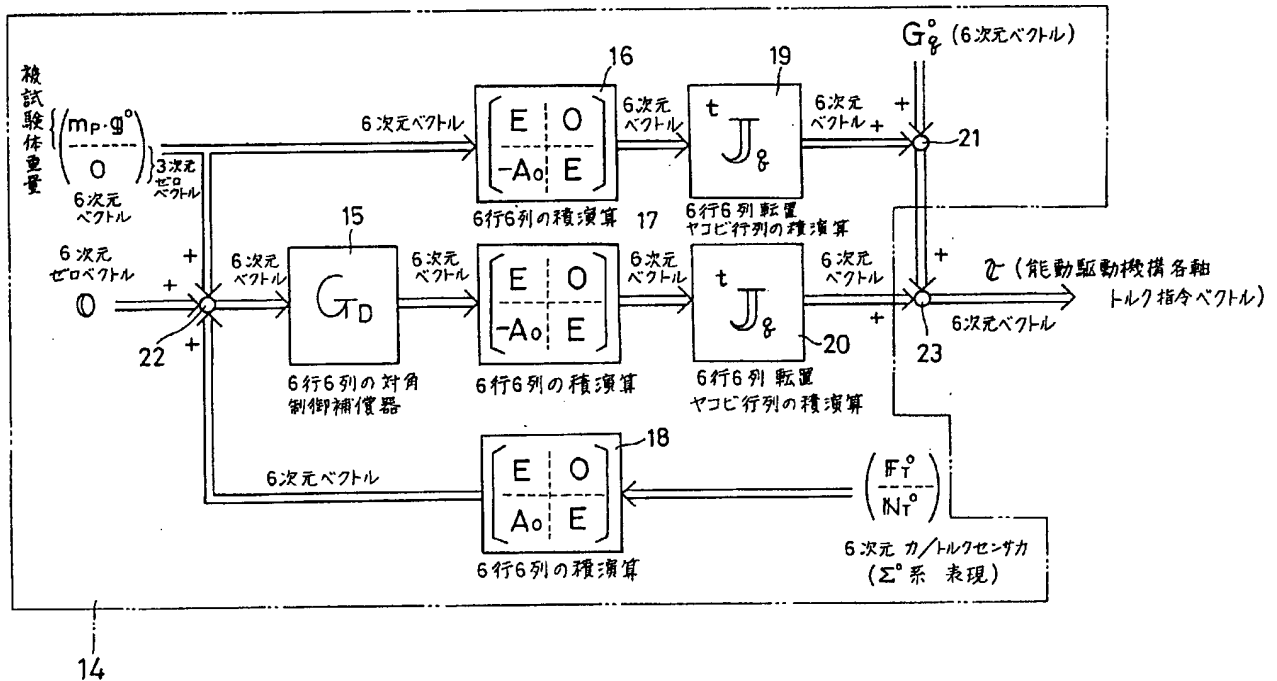
第 4 図



第 5 図



第 6 图



第 7 図

